Über Verwendung von Brennstoffgemischen aus Braunkohle und Koksgrus im E.-Werksbetrieb

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. MARTIN BLANKE

aus Berlin

Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Baer

Korreferent: Prof. Dr. Suhrmann

Tag der mündlichen Prüfung: 23. 6. 1932

Berlin 1934

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Ueber Verwendung von Brennstoffgemischen aus Braunkohle und Koksgrus im E. - Werksbetrieb

Die nachstehenden Versuche wurden im Auftrage der Berliner Städtische Elektrizitätswerke Akt.-Ges.(Bewag) ausgeführt.

Es sei mir an dieser Stelle gestattet, dem Vorstand der Bewag für die Genehmigung zur Veröffentlichung und Herrn Dr.-Ing. E. Schulz für seine freundliche Unterstützung ergebenst zu danken.

Ein Auszug aus der Dissertation erscheint auch im

„Archiv für Wärmewirtschaft und Dampfkesselwesen"

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Einleitung	5
B. Aufbereitung von Brennstoffgemischen aus Braunkohle und Koksgrus	7
I. Durchführung der Versuche Versuchseinrichtung - Mahlgut - Entmischung - Wägung - Probenahme - Messung -	7
II. Auswertung der Versuchsergebnisse	
a) Vermahlung des Brennstoffgemisches Mahlfeinheit - Durchsatz - Gesamtarbeit - Leerlaufarbeit - Zusatzarbeit - Verschleiss der Mühle - Vergleich mit den Ergebnissen von Rosin -	10
b) Förderarbeit Förderung für die Aufbereitung - Pneumatische Förderung	23
c) Trocknung des Koksgruses	26
d) Aufzuwendende Gesamtarbeit für die Aufbereitung	26
III. Zusammenfassung	27
C. Brenntechnische Eigenschaften des Staubgemisches	
I. Brennstoffanalyse	28
II. Zündfähigkeit	30
III. Ausbrand	33
IV. Flammentemperatur	33
V. Brennpunktsbestimmung Brennpunktsmesser - Schaltung der Versuchsanlage - Instrumente - Ausführung der Versuche - Ergebnis	34
VI. Zusammenfassung	41
D. Wirtschaftlichkeit der Verfeuerung von Koksgrus und Braunkohle in Staubform	42
I. Aufbereitungskosten	42
II. Umschlagkosten	44
III. Herstellungskosten des Brennstaubes	45
IV. Was darf 1 t Koksgrus und 1 t Braunkohle dem E.-Werk kosten?	45
E. Schlusswort	46
Schrifttum	47
Lebenslauf	48

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543114_0126

A. Einleitung

In den letzten Jahren ist verstärkt die Forderung nach einem wirtschaftlichen Zusammenarbeiten von Gas- und Elektrizitätswerken aufgetreten, da es manchmal schwierig ist, den beim Gaswerk anfallenden Koks unter günstigen Bedingungen abzusetzen. Grundsätzlich ist hierüber zu sagen, dass die Kupplung im Sinne einer fortschrittlichen Entwickelung nur dann berechtigt ist, wenn beide Werke einen wirtschaftlichen Gewinn davontragen. Es wäre nicht angebracht, den Vorteil eines geregelten Koksabsatzes durch unwirtschaftliche Stromerzeugung zu erkaufen, sondern es müssten im Gegenteil geringere Stromkosten herausspringen.

An sich entspricht der Gedanke, die Kohle im Gaswerk zu entgasen und anschliessend im E.-Werk zu verfeuern in idealer Weise den neuzeitlichen Bestrebungen nach Kohlenveredelung; in der Praxis jedoch steht seiner Verwirklichung vielfach die Gaskoksschere im Wege. Je höher der Erlös aus dem Koksabsatz ausfällt, desto billiger kann das Gas an den Konsumenten abgegeben werden, sodass eine Herabsetzung der Kokspreise zugunsten einer wirtschaftlichen Kupplung zwischen Gas- und E.-Werken nur im Zusammenhang mit einer Uebersättigung des Koksmarktes denkbar ist. Angesichts der schweren wirtschaftlichen Depression unseres Vaterlandes, welche auch im Hausbrand und in der Erstellung von Zentralheizungsanlagen zu Sparmassnahmen führt, scheint es nicht ausgeschlossen, dass der Koksabsatz in absehbarer Zeit ins Stocken gerät. Von beachtlicher Bedeutung dürfte in diesem Zusammenhang die Planung und Erweiterung der Stadtheizungen sein, welche mit den E.-Werken gekuppelt, zugunsten einer wirtschaftlichen Wärme-Krafterzeugung den Koksabsatz für den Hausbrand zwangläufig einschränken.

Die technische Lösung der Verfeuerung von Gaskoks unter den Kesseln der E.-Werke begegnet infolge seines geringen Gehalts an flüchtigen Bestandteilen gewissen Schwierigkeiten. Schon vor zwanzig Jahren versuchte man, Gaskoks in der Kesselfeuerung zu verbrennen, ohne jedoch das Ziel einer vollkommenen Verbrennung zu erreichen. Erst in der Nachkriegszeit, die mit der Vervollkommnung der Kohlenstaubfeuerung auch neue Erkenntnisse auf dem Gebiete der Rostfeuerung brachte, gelang es, den Wirkungsgrad der Koksfeuerung zu verbessern. Das Gaswerk Berlin-Tegel[1] hat beispielsweise eine einwandfreie Verfeuerung von Gaskoks auf Wanderrosten durch eine zweckmässige Gestaltung des Feuerraumes erreicht.

---

1) Gas- und Wasserfach 1928, Heft 39, Seite 937, Albach, Berlin-Tegel, „Ueber Koksgrus-Feuerungen".

Angesichts der günstigen Erfahrungen, welche man mit der Verbrennung von Magerkohlen und Brennstoffgemischen in der Staubfeuerung gemacht hat, erscheint es auffallend, dass ein Versuch, Gaskoks zusammen mit gasreichen Brennstoffen in Staubform zu verfeuern, bisher nicht unternommen wurde. Die Gründe hierfür sind wirtschaftlicher Natur und beruhen einerseits auf den zu erwartenden aussergewöhnlichen Kosten für die Aufbereitung, andererseits auf dem eingangs erwähnten hohen Marktpreis des Gaskokses. Während z.B. in Mitteldeutschland für Steinkohle mit einem H_u von 6000 Kcal frei Werk etwa 17 M/t gezahlt werden, kostet Gaskoks bei gleichem Heizwert 31,50 M/t. Wesentlich günstiger liegen die Verhältnisse für Koksgrus, der vielleicht zu einem Marktpreis von 10 M/t geliefert werden kann. Die Verfeuerung von Koksgrus in Staubform könnte daher Erfolg versprechen, wenn es möglich wäre, die Aufbereitungskosten auf ein erträgliches Mass zu beschränken und die Zündfähigkeit durch Beimischung eines Brennstaubes mit hohem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen zu steigern.

Zur Klärung dieser Frage wurde dem Verfasser von der Berliner Städtische Elektrizitätswerke Akt.-Ges. die Aufgabe übertragen, eine Reihe von Laboratoriums- und Betriebsversuchen[2] auszuführen, deren Ergebnisse in dieser Arbeit zusammengefasst sind. Als Brennstoff mit hochflüchtigen Bestandteilen wurde vorgetrocknete Braunkohle gewählt und dem Koksgrus vor der Vermahlung beigemischt. Die Versuchsergebnisse sind in drei Abschnitten zusammengefasst, in denen die Aufbereitung, die brenntechnischen Eigenschaften und die Wirtschaftlichkeit der Verfeuerung vorstehender Brennstoffgemische behandelt werden.

---

2) Es ist mir eine angenehme Pflicht, Herrn Dipl.-Ing. Doettloff, der mir bei der Durchführung der Mahl- und Brennversuche tatkräftig zur Seite stand, auch an dieser Stelle für seine Unterstützung zu danken.

B. Aufbereitung von Brennstoffgemischen

aus Braunkohle und Koksgrus

I. Durchführung der Versuche

Ueber die Vermahlung von Koks auf Ringwalzenmühlen lagen bisher keine Ergebnisse vor. Dagegen sind in den letzten Jahren über die Vermahlung von Braunkohle und Steinkohle ausführliche Berichte[3] veröffentlicht worden, die insofern wertvoll sind, als sie brauchbare und allgemein gültige Formeln für die Vermahlung enthalten. Bemerkenswert ist, dass die letztgenannten Versuche von Rosin-Dresden und Schulz-Berlin[4] mit derselben Mühle ausgeführt wurden, welche für die vorliegenden Versuche verwendet wurde.

Der Gang der Versuche war damals folgender:

Um die Abhängigkeit der Mühlenleistung und der Mahlfeinheit vom Wassergehalt des Mahlgutes zu ermitteln, war eine Versuchsreihe mit Steinkohlen verschiedener Feuchtigkeit aufgestellt und die Mühle jeweils bis zur Höchstgrenze belastet worden. Die Versuche hatten ergeben, dass die Leistung und die Mahlfeinheit mit zunehmender Feuchtigkeit des Brennstoffes abnimmt. Hierdurch war man gezwungen, die Versuchsergebnisse auf konstante Mahlfeinheit umzurechnen und den Wirkungsgrad des Windsichters durch weitere Versuche zu ermitteln. Die Untersuchung des Windsichters führte zu dem Ergebnis, dass sein Wirkungsgrad mit zunehmender Mahlfeinheit des Staubes sinkt. Er war z.B. bei einer Feinheit von 30% (4 900) mit 40 v.H. und bei 15% (4 900) mit 12 v.H. ermittelt worden.

Da bei den vorliegenden Versuchen nicht ein homogener Brennstoff, sondern ein Gemisch von Braunkohle und Koks vermahlen werden sollte, war der oben angeführte Weg nicht gangbar. Für jede Zusammensetzung des Gemisches hätten sämtliche vorstehend beschriebene Versuche ausgeführt werden müssen, was technisch schwer durchführbar gewesen wäre. Es musste versucht werden, auf kürzerem Wege zum Ziel zu kommen. Hierfür gab es nur eine Möglichkeit: Vermahlung bei konstanter Feinheit. Nachdem durch eine Reihe von Vorversuchen die Wirkungsweise des Windsichters und die günstigste

---

3) Archiv f. Wärmewirtschaft 1926, Heft 2 und 3, S. 54-57 und S. 81 - 85
4) Archiv f. Wärmewirtschaft 1927, Heft 3 und 4, S. 69-73 und S. 109 - 115

Mahlfeinheit ermittelt worden waren, gelang es, auch bei verschiedenen Mischungen und Belastungen die Mahlfeinheit konstant zu halten, sodass die für die Umrechnung erforderlichen Versuche erspart werden konnten.

Die Mahlversuche wurden in der Kohlenmahlanlage des Kraftwerkes Moabit ausgeführt, welche für die Dauer eines Versuches ausser Betrieb gesetzt wurde. Von der Kraftwerksleitung wurden wir aufs Tatkräftigste unterstützt.

Versuchseinrichtung:

Als Versuchsmühle diente eine Maxecon-Mühle der Fa. C.v.Grueber, Berlin, von etwa 1,5 t/h Durchsatz (Abb.1). Das Gesamtaggregat, welches aus der Mühle a, dem Becherwerk b und dem Windsichter c bestand, wurde von einem gemeinsamen Motor d angetrieben, so dass sich sämtliche Versuchsdaten auf den kompletten Mahlsatz beziehen. Zwischen Windsichter und Mühle war ein Mühlenbunker e eingeschaltet, der etwa 2 t fasste und zur Aufnahme des Mahlgutes und der aus dem Windsichter austretenden Griese diente. Eine besondere Aufgabevorrichtung für das Mahlgut war nicht vorhanden; normalerweise wurde die Kohlenzufuhr durch den Absperrschieber am Mühleneinlauf reguliert. Hierbei trat häufig die Erscheinung auf, dass der feinkörnige Staub ins Schiessen kam und die Mühle überschüttete. Diesem Uebel suchte man dadurch zu begegnen, dass man die Schichthöhe in dem Mühlenbunker so niedrig wie möglich hielt. Damit wurde gleichzeitig einer Entmischung des Mahlgutes nach Möglichkeit gesteuert.

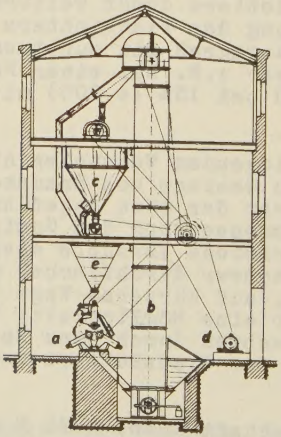


Abb.1. Versuchsanlage

Mahlgut: Vermahlen wurde eine vorgetrocknete Braunkohle der Grube Ilse mit 14 - 16% Wassergehalt, wie sie zur Brikettierung verwendet wird und Koksgrus von der Städt. Gasanstalt Charlottenburg mit 19 - 23% Wassergehalt und einer Körnung von 0 - 30 mm. Von einer weiteren Trocknung der Braunkohle in der Mahlanlage glaubte man absehen zu dürfen; dagegen schien es von vornherein ratsam, den Koksgrus zu trocknen. Um die Rentabilität des Trocknens ermitteln zu können, wurde auch eine Versuchsreihe mit ungetrocknetem Koksgrus ausgeführt. Die beiden Versuchsreihen sind durch Buchstaben in folgender Weise gekennzeichnet:

A Brennstoffgemische aus vorgetrockneter Braunkohle und ungetrocknetem Koksgrus

B Brennstoffgemische aus vorgetrockneter Braunkohle und getrocknetem Koksgrus.

Entmischung: Infolge des grösseren spezifischen Gewichtes des Koksgruses entmischte sich das Mahlgut im Bunker derart, dass der Koksgrus schneller zum Auslauf gelangte als die Braunkohle. Im Mühlenbunker war die Neigung zur Entmischung so stark, dass der Koksgrus, welcher erst nach einer zwei- bis dreifachen Menge Braunkohle aufgegeben wurde, die unteren Braunkohlenschichten verdrängte und vor der Braunkohle zur Vermahlung kam. Ausser dem geringeren spezifischen Gewicht der Braunkohle mag hierbei vielleicht auch ihre Neigung zum Anbacken an die Bunkerwände eine Rolle spielen. Für die Praxis ergibt sich hieraus, dass der Koksgrus und die Braunkohle am besten durch zwei getrennte Aufgabevorrichtungen der Mühle unmittelbar zugeführt werden, wodurch einerseits jede beliebige Mischung eingestellt, andererseits eine Entmischung des Mahlgutes vermieden werden kann. Störend wirkte bei den Versuchen der Umstand, dass die Entstaubungsanlage ausser Betrieb gesetzt werden musste, da die vorhandene Elektrofilteranlage nur für Steinkohlenentstaubung eingerichtet war. Die Folge war, dass der Braunkohlenstaub in dichten Schwaden aus der Mühle und den Förderanlagen herausquirlte und die Atmung erheblich beeinträchtigte.

Die Wägung des Mahlgutes erfolgte bei den Versuchen A (ohne Trocknung) in Säcken vor der Aufgabe in den Mühlenbunker. Bei den Versuchen B (Trocknung des Koksgruses) wurde der feuchte Koksgrus vor dem Trockner gewogen, der getrocknete Koksgrus dann in Säcken zum Mühlenbunker hinaufbefördert, dort gewogen und mit der entsprechenden Menge Braunkohle zusammen aufgegeben.

Die Probenahme des Koksgruses machte Schwierigkeiten, da sein Feuchtigkeitsgehalt sehr ungleichmässig war. Um einwandfreie Durchschnittsproben zu erhalten, wurde die für jeden Versuch bereit gestellte Koksmenge (etwa 2 - 3 t) auf dem Lagerplatz umgeschaufelt, glattgestrichen und in gleiche Segmente geteilt, aus denen zunächst grössere Probemengen entnommen und durch weitere Teilung die Durchschnittsproben gewonnen wurden. Für die Probenahme des Brennstaubes wurde

am Auslauf des Windsichters eine besondere Vorrichtung angebracht, die so eingerichtet war, dass durch Betätigung einer Klappe der gesamte aus dem Windsichter entfallende Staub in einen kleinen Entnahmeschacht geleitet wurde, aus dem er bei vollkommenem Luftausgleich ohne Verluste an feinstem Korn in das Probegefäss abgezogen werden konnte. Diese Einrichtung bewährte sich und beseitigte die Unsicherheit in der Probenahme des Brennstaubes.

Bei den Versuchen ohne Trocknung wurden folgende Messungen ausgeführt:

1. Wägung der Braunkohle und des Koksgruses vor der Aufgabe in den Mühlenbunker.
2. Bestimmung der Feuchtigkeit des Mahlgutes vor der Aufgabe in den Mühlenbunker.
3. Leerlauf-Kraftbedarf vor und nach jedem Mahlversuch.
4. Kraftverbrauch für die Vermahlung (durch minutliche Ablesung am Präzisions-Instrument und durch kWh-Zähler).
5. Zeitdauer der Vermahlung.
6. Kontrolle der Feinheitskennlinie während des Versuchs.
7. Bestimmung der Staubfeuchtigkeit und -Feinheit (Siebmaschine nach Förderreuther) im Laboratorium.
8. Kraftverbrauch für die Förderung in der Mahlanlage.
9. Kraftverbrauch für die pneumatische Förderung zum Kesselhaus.

Bei den Versuchen mit getrocknetem Koksgrus kamen für die Trocknung noch folgende Messungen hinzu:

10. Dampfverbrauch des Trockners (durch Staurand)
11. Kraftverbrauch des Trockners (durch kWh-Zähler)
12. Zeitdauer des Trocknens
13. Wägung des getrockneten Koksgruses
14. Bestimmung der Koksgrus-Feuchtigkeit hinter dem Trockner.

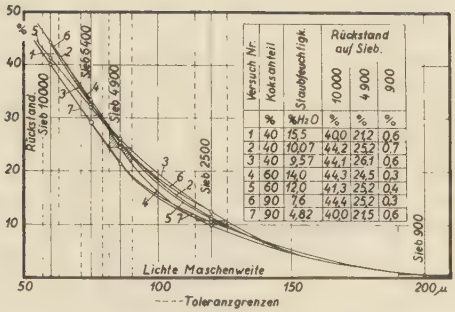
Es wurde jeweils der Kraftverbrauch an der Motorwelle, nicht derjenige an der Arbeitswelle, in Rechnung gestellt.

II. Auswertung der Versuchsergebnisse

a) Vermahlung des Brennstoffgemisches

Die Ergebnisse der Siebanalysen sind in Abb.2 und Zahlentafel 2 zusammengestellt. Die Feinheitskennlinien der Brennstaubmischungen zeigen geringe Abweichungen, überschreiten aber an keiner Stelle die für die Siebanalysen zulässigen Toleranzen, sodass die Konstanz der Mahlfeinheit für diese Versuchsreihen gewahrt ist.

Die Mahlfeinheit, welche im Mittel 24% (4 900) betrug, mag im Vergleich zu der Feinheit, welche für Steinkohlenstaub gefordert wird (15 - 20% (4 900)) gering erscheinen. Es soll vorweg genommen werden, dass bei Vorversuchen für eine Mischung von 40% Braunkohle und 60% getrocknetem Koksgrus ohne



Versuch Nr.	Koksanteil	Staubfeuchtigk.	Rückstand auf Sieb. 10000	4900	900
	%	%H₂O	%	%	%
1	40	13,5	4,00	21,2	0,6
2	40	10,07	44,2	23,2	0,7
3	40	9,57	44,1	26,1	0,6
4	60	14,0	44,3	24,5	0,3
5	60	12,0	41,3	25,2	0,4
6	90	7,6	44,4	25,2	0,3
7	90	4,82	4,00	21,5	0,6

Abb.2. Feinheitskennlinien d. vermahlenen Brennstoffmischungen aufgetragen über der lichten Maschenweite.

Schwierigkeiten eine Feinheit von 13,9% (4 900) erreicht werden konnte. Wenn den Versuchen eine geringere Feinheit zugrunde gelegt wurde, so lag es daran, dass man bei allen Versuchen die Mahlfeinheit konstant halten wollte. Für Gemische, in denen der Braunkohlenanteil überwiegt, wird aber die gewählte Feinheit um so zutreffender sein, als für Braunkohlenstaub, dessen grössere Staubteilchen meist nicht aus Kohlen, sondern aus Holzsplitterchen bestehen, eine Staubfeinheit von nur 25 - 30% (4 900) gefordert wird. Praktisch wird die erforderliche Feinheit durch den Ausbrand der Schlacke bei der Verfeuerung des Brennstaubes entschieden werden.

Durchsatz: Die Mühle wurde bei allen Versuchen so belastet, dass eine konstante Mahlfeinheit von 24% (4 900) erreicht wurde. In vielen Fällen war diese Belastung mit der Höchstleistung der Mühle identisch. Aus Abb.3 (Zahlentafel 1) ist ersichtlich, dass der Durchsatz der Mühle bei konstanter Mahlfeinheit mit zunehmendem Koksgehalt und ansteigender Feuchtigkeit des Mahlgutes erheblich zurückgeht. Der Mühlendurchsatz ist somit eine Funktion des Koksanteils und der Feuchtigkeit.

$$y = f(k,h),$$

worin y den Mühlendurchsatz in t/h, k den Koksanteil und h den Wassergehalt in Hundertsteln bezeichnen. Die Abhängigkeit des Mühlendurchsatzes von den beiden Variabeln ist hyperbolisch und wird durch folgende Gleichung gekennzeichnet

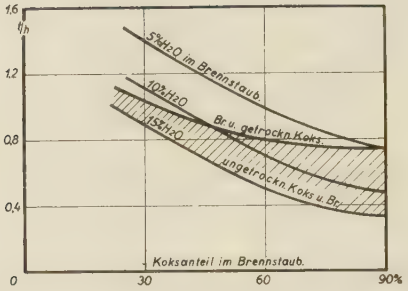


Abb.3. Maximaler Mühlendurchsatz in Abhängigk. von der Brennstaub-Mischung und Feuchtigkeit.

Zahlentafel 1.

Versuch No.	Koksanteil %	Brennstaubfeuchtigk. % H_2O	Max. Belastung t/h	Rückstand auf Sieb 10000 %	Rückstand auf Sieb 900 %
1	40	15,5	0,73	40,0	0,6
2	40	10,07	1,11	44,2	0,7
3	40	9,57	1,00	44,1	0,6
4	60	14,00	0,53	44,3	0,3
5	60	12,00	0,67	41,3	0,4
6	90	7,6	0,57	44,4	0,3
7	90	4,82	0,74	40,0	0,6

Maximale Mühlenbelastung bei verschiedenen Mischungen in Abhängigkeit von der Brennstaubfeuchtigkeit.

$$y = \frac{9}{(78\,h + 0{,}6)\,.\,(k^2 + k) + 4{,}6} \text{ t/h}$$

Die beiden Klammerausdrücke unter dem Bruchstrich kennzeichnen den bremsenden Einfluss des Koksanteils in der Mischung. Der Umstand, dass die k-Klammer mit dem Feuchtigkeitsfaktor multipliziert ist, deutet darauf hin, dass der Mühlendurchsatz stark abnimmt, wenn die Feuchtigkeit in der Koksmischung ansteigt. Bei der Vermahlung eines Gemisches von 90% Koksgrus und 10% Braunkohle sinkt der Durchsatz dementsprechend innerhalb der Feuchtigkeitsgrenzen von 5 und 15% H_2O von 0,73 t/h auf 0,35 t/h, also um 57% (Abb.4). Mit abnehmendem Koksgehalt verliert auch der Feuchtigkeitseinfluss an Bedeutung, und zwar derart, dass er im Grenzfall für reine Braunkohle zu Null wird, wie aus der partiellen Differentiation nach h ersichtlich ist.

$$\frac{\partial y}{\partial h} = \lim_{k=0} \frac{-9\,.\,78\,(k^2 + k)}{[(78\,h + 0{,}6)\,.\,(k^2 + k) + 4{,}6]^2} = \frac{0}{4{,}6^2} = 0$$

Innerhalb der Grenzen von 0 - 16% Feuchtigkeit wird also bei der Vermahlung reiner Braunkohle der Mühlendurchsatz so wenig beeinflusst, dass die Abnahme praktisch nicht in Erscheinung tritt.

Streng genommen gelten die obigen Gleichungen nur innerhalb der Grenzen k = 0,4 - 0,9 und h = 0,05 - 0,16, da die Versuche nur in diesem Rahmen ausgeführt wurden. Man sieht aber bei Betrachtung der Grenzbedingungen, wie unterschiedlich der Einfluss ist, den die Feuchtigkeit auf die Mahlbarkeit von Braunkohle und Koksgrus ausübt.

Das schraffierte Feld in Abb.3 stellt das Gebiet dar, welches für die Praxis in Frage kommt. Verzichtet man auf die Trocknung des Koksgruses, so erhält man die Kurve für

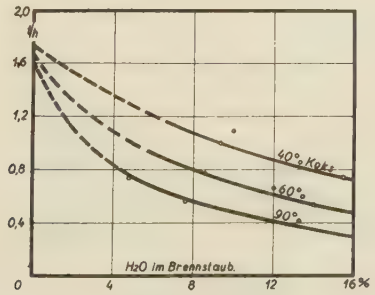


Abb.4. Maximaler Mühlendurchsatz bei versch. Mischungen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit d. Brennstaubes.

ungetrockneten Koksgrus und Braunkohle, welche für eine konstante Brennstaubfeuchtigkeit von 15% gültig ist. Wird dagegen der Koksgrus auf 5% H_2O getrocknet und die Braunkohle wie im ersten Falle mit 16% durchschnittlicher Feuchtigkeit zugemischt, so erhält man Brennstaub verschiedener Feuchtigkeit und der Durchsatz entspricht der Kurve für die Mischungen B aus Braunkohle und getrocknetem Koksgrus. Bei der Umrechnung wurde die Nachtrocknung durch die Vermahlung berücksichtigt, welche je nach der Mischung 1 - 2% H_2O beträgt. Für jeden Feuchtigkeitsgehalt des Koksgruses zwischen 5 und 19% und für jede Mischung der Brennstoffe liegt bei konstanter Feuchtigkeit der Braunkohle der Mühlendurchsatz innerhalb der schraffierten Fläche.

Die spezifische Gesamtarbeit ist der Quotient aus der Gesamt-Energieaufnahme E und dem Mühlendurchsatz D

$$A_{ges} = \frac{E}{D} \text{ kWh/t.}$$

Die Abhängigkeit der Mahlarbeit vom Koksanteil der Mischung entspricht einer Parabel 3. Grades (Abb.5) von der Form

$$y_{ges} = h\,(510k^3 - 407k^2 + 269k + 33) + 0{,}6k^2 + 2{,}6k + 13{,}8 \text{ kWh/t}$$

worin y die Gesamt-Mahlarbeit in kWh/t, h und k die Feuchtigkeit und den Koksanteil der Mischung in Hundertsteln bezeichnen. In ähnlicher Weise wie bei dem Mühlendurchsatz ist auch in dieser Formel der Koksanteil mit dem Feuchtigkeitsfaktor multipliziert, nur mit dem Unterschied, dass auch die Feuchtigkeit der Braunkohle einen Einfluss ausübt, der durch das Glied 33 zum Ausdruck gebracht wird.

Bei konstantem Wassergehalt beträgt der Zuwachs

$$\frac{\partial y}{\partial k} = h\,(1530k^2 - 814k + 269) + 1{,}2k + 2{,}6$$

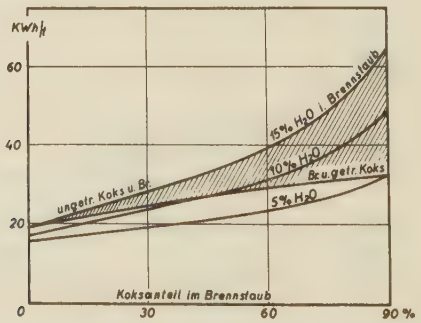


Abb.5. Spez. Gesamtarbeit der Mühle in Abhängigkeit von d.Mischung b.versch. Feuchtigkeit des Brennstaubes.

Die aussergewöhnliche Verminderung der Mahlbarkeit des Koksanteils mit ansteigendem Wassergehalt wird durch das Produkt aus dem Feuchtigkeitsfaktor h und dem Klammerausdruck veranschaulicht. Bei feuchter Koksmischung ist der Zuwachs der Gesamt-Mahlarbeit nach ∂ k quadratisch, bei trocknem Koks, d. h. für h = 0 würde er nur linear sein. Die partielle Ableitung in diesem Falle ergibt

$$\frac{\partial y}{\partial k} = 1{,}2\ k + 2{,}6.$$

Betrachtet man die Abhängigkeit der Gesamt-Mahlarbeit vom Wassergehalt, so findet man, dass diese linear ist. Die partielle Ableitung nach h ergibt

$$\frac{\partial y}{\partial h} = 510\ k^3 - 407\ k^2 + 269\ k + 33.$$

Für konstanten Koksgehalt ist somit der Zuwachs konstant und für k = 0, d.h. für reine Braunkohle beträgt er 33 kWh/t. Zur besseren Uebersicht sei der Ausdruck

$$„510\ k^3 - 407\ k^2 + 269\ k" = z$$

gesetzt. Man sieht dann, dass sich die Steigung der Graden in Abb.6 aus zwei Winkeln zusammensetzt, und zwar aus den Winkeln für die Braunkohle und für den Koksanteil, deren trigonometrische Tangenten „33" und „z" betragen.

$$\frac{\partial y}{\partial h} = z + 33$$

In Erkenntnis dieses Zusammenhanges kann man die Ausgangsgleichung folgendermassen zusammenfassen:

$$A_{ges} = h \cdot (K_1 + B_1) + K_2 + B_2 \text{ kWh/t.}$$

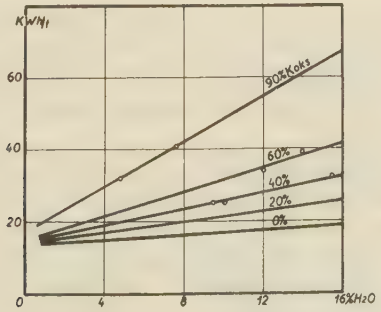


Abb.6. Spez. Gesamtarbeit der Mühle in Abhängigk. von der Feuchtigkeit des Brennstaubes b.versch.Mischungen.

Hierin bedeuten: h = Feuchtigkeit des Brennstaubes in Hundertsteln
$K_1 = 510\ k^3 - 407\ k^2 + 269\ k$
$K_2 = 0{,}6\ k^2 + 2{,}6\ k$
$B_1 = 33$
$B_2 = 13{,}8$

Die ursprüngliche Gleichung ist somit auf eine Gleichung bekannter Form zurückgeführt. Für den Koksanteil „0", d.h. für reine Braunkohle werden K_1 und $K_2 = 0$ und man erhält die Funktion

$$A_{ges} = h \cdot B_1 + B_2\ kWh/t \quad \text{oder in Zahlen}$$

$$A_{ges} = 33\ h + 13{,}8\ kWh/t.$$

Die vorstehenden Ergebnisse lassen bereits die Richtung erkennen, welche man aus technischen Gründen bei der Vermahlung von Brennstoffgemischen aus Braunkohle und Koksgrus einschlagen wird. Man wird die Braunkohle, wenn sie wie im vorliegenden Falle mit einem Wassergehalt von 15 - 17% angeliefert wird, im Hinblick auf den flachen Anstieg der Gesamtarbeit ungetrocknet vermahlen, den Koksgrus dagegen weitgehend trockenen, damit die Mahlarbeit verringert wird. Dieses Verfahren kann eventuell zum Vermahlen auf zwei getrennten Mühlen führen.

Als Beispiel hierfür sei angenommen, dass ein Gemisch von 40% Koksgrus und 60% Braunkohle vermahlen werden soll und die Feuchtigkeit der ungetrockneten Braunkohle 17%, diejenige des getrockneten Koksgruses 2% betragen. Die Mischung hat dann eine durchschnittliche Feuchtigkeit von 11% ohne Berücksichtigung der Nachtrocknung beim Vermahlen, und als Gesamtarbeit erhält man aus der obigen Gleichung 27 kWh/t. Bei getrennter Vermahlung auf zwei Mühlen würden sich für den Koksgrus 25 kWh/t, für die Braunkohle 20 kWh/t und insgesamt nur 22 kWh/t ergeben, sodass die getrennte Vermahlung hinsichtlich des Arbeitsbedarfes günstiger abschneidet als die gemeinschaftliche.

Solange aber die Feuchtigkeit des getrockneten Koksgruses 5% nicht unterschreitet, ist es angebracht, beide Brennstoffe gemeinsam zu vermahlen, da einerseits der Kraftbedarf geringer ist, andererseits eine besondere Mischvorrichtung für die Brennstaube gespart wird.

Der Mahlbereich, welcher sich praktisch verwirklichen liess, ist wieder durch zwei Grenzkurven gekennzeichnet. Für die Grenzkurve „ungetrockneter Koks und Braunkohle" ist die Vermahlung von Braunkohle und ungetrocknetem Koks zugrunde gelegt. Alle Mischungen ergeben dann eine Staubfeuchtigkeit von 15%, sodass die obere Grenzkurve mit der Kennlinie 15% H_2O zusammenfällt. Die untere Grenzkurve „Braunkohle und getrockneter Koks" wurde in der Annahme ermittelt, dass Braunkohle und getrockneter Koks zur Vermahlung kommen, sodass der Feuchtigkeitsgehalt des Brennstaubes entsprechend der Mischung des Mahlgutes die Werte 5 -

15% H_2O annimmt. Das schraffierte Feld enthält daher die spezifischen Gesamtarbeiten für sämtliche Mischungen aus Braunkohle von konstanter Feuchtigkeit (17%) und Koksgrus von 5 - 19% Feuchtigkeit.

Die spezifische Leerlaufarbeit erhält man aus der Gleichung

$$A_L = \frac{N_L}{D} = \frac{konst.}{D} \quad ,$$

worin A_L die Leerlaufarbeit, N_L den konstanten Leerlaufkraftbedarf und D der Mühlendurchsatz in t/h bezeichnen. Da die Funktion von D (Abb.3) eine Hyperbel zweiten Grades ist, für die man die Gleichung setzen kann

$$D = \frac{konst.}{x^2} \quad ,$$

ergibt sich für die Leerlaufarbeit die Gleichung

$$A_L = x^2 \quad ,$$

d.h. eine Parabel (Abb.7). Die vollständige Gleichung lautet

$$y_L = (78\ h + 0{,}6) \cdot (k^2 + k) + 4{,}6 \text{ kWh/t},$$

worin y_L die Leerlaufarbeit, h und k den Wassergehalt und den Koksanteil der Brennstoffmischung bedeuten. Der Koksanteil ist wieder mit dem Feuchtigkeitsfaktor h multipliziert, im übrigen ist aber der Aufbau der Gleichung wesentlich einfacher und übersichtlicher.

Die partielle Differentiation nach h ergibt bei konstantem Koksanteil

$$\frac{\partial y}{\partial h} = 78 (k^2 + k).$$

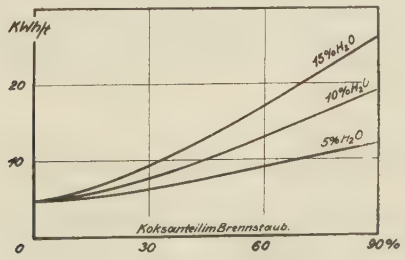


Abb.7. Spez. Leerlaufarbeit in Abhängigkeit von der Mischung bei verschiedener Feuchtigkeit des Brennstaubes.

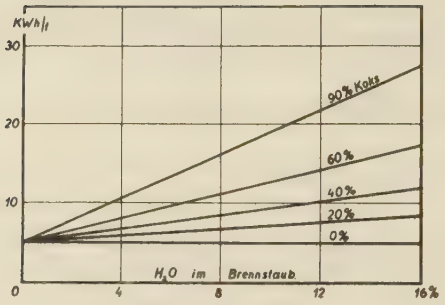


Abb.8. Spez. Leerlaufarbeit der Mühle in Abhängigk. von der Feuchtigkeit des Brennstaubes b.versch. Mischungen.

Der Zuwachs der Leerlaufarbeit ist also in Abhängigkeit von ∂h bei konstantem Koksgehalt der Mischung konstant und wird für k = o, d.h. für reine Braunkohle zu Null. Im rechtwinkligen Koordinaten-System stellt sich diese Abhängigkeit als ein gradliniges Strahlenbündel dar (Abb.8), welches allerdings nicht in einem Punkt zusammenläuft, da die Hauptgleichung für h = 0 folgende Form annimmt

$$y_{h=0} = 0{,}6\ (k^2 + k\ ) + 4{,}6\ \text{kWh/t}.$$

Zeichnerisch kommt dieser Unterschied nicht klar zum Ausdruck.

Die spezifische Zusatzarbeit ergibt sich aus der Differenz von Gesamtarbeit und Leerlaufarbeit

$$A_Z = A_{ges} - A_L\ .$$

Da es gelang, die Mahlfeinheit konstant zu halten, konnte die Zusatzarbeit aus den Versuchsergebnissen ohne Umrechnung abgeleitet werden (Zahlentafel 2). Die Gleichung für die Zusatzarbeit ist eine Parabel dritten Grades und resultiert aus der Differenz der beiden Gleichungen für Gesamt- und Leerlaufarbeit.

$$y_{ges} - y_L = y_Z$$

$$y_Z = h\ (\ 510\ k^3 - 485\ k^2 + 191\ k + 33\ ) + 2\ k + 9{,}2\ \text{kWh/t}.$$

Die Ableitung nach k ergibt bei konstantem Feuchtigkeitsgehalt

$$\frac{\partial\, y}{\partial\, k} = h\ (\ 1530\ k^2 - 970\ k + 191\ ) + 2\ .$$

Für h = 0, d.h. für trockene Brennstoffgemische ist der Zuwachs nach ∂ k konst. = 2. Die Zusatzarbeit steigt in diesem

Zahlentafel 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
Koksanteil	Feuchtigkeit des Kokses	Feuchtigkeit der Braunkohle	Feuchtigkeit des Brennstoffgemisches	Feuchtigkeit des Brennstaubes	Leistung.	Gesamtarbeit A ges.	Leerlaufarbeit AL	Zusatzarbeit Az	Gesamt-Kraftbedarf	Leerlauf-Kraftbedarf	Zusatz-Kraftbedarf	Rückstand auf Sieb				
%	% H_2O	% H_2O	% H_2O	% H_2O	t/h	KWh/t	KWh/t	KWh/t	KW	KW	KW	10000 %	6400 %	4900 %	2500 %	900 %
40	20	15	17	15,5	0,73	31,7	12,3	19,4	23,1	9,0	14,1	40	29,1	21,2	9,9	0,6
40	5,42	14,22	10,7	10,07	1,11	24,7	8,1	16,6	27,4	9,0	18,4	44,2	33,5	25,2	11,1	0,7
40	4,5	13,70	10,02	9,57	1,00	25,8	9,0	16,8	25,8	9,0	16,8	44,1	32,5	26,1	12,5	0,6
60	17,2	14,7	16,2	14	0,53	38,7	17	21,7	20,5	9,0	11,5	44,3	33,0	24,5	9,9	0,3
60	11,7	13,6	12,5	12	0,67	34,2	13,4	20,8	22,9	9,0	13,9	41,3	32,0	25,2	11,4	0,4
90	9,0	13,0	9,4	7,6	0,57	41,1	15,8	25,3	23,4	9,0	14,4	44,4	33,0	25,2	12,6	0,3
90	5,22	14,2	6,1	4,82	0,74	31,7	12,2	19,5	23,4	9,0	14,4	40,0	28,8	21,5	10,5	0,6

Abhängigkeit der Mahlarbeit von Koksgehalt und Brennstaubfeuchtigkeit bei konstanter Mahlfeinheit.

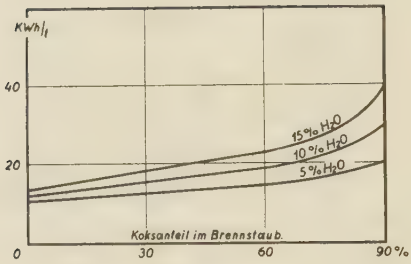


Abb.9. Spez. Zusatzarbeit in Abhängigkeit von der Mischung bei verschiedener Feuchtigkeit des Brennstaubes.

Falle gradlinig an nach der Gleichung

$$y_{\substack{z \\ h=0}} = 2\,k + 9{,}2 \text{ kWh/t.}$$

Beim Uebergang von trockner zur feuchten Brennstoffmischung wird der Zuwachs quadratisch, sodass sich in diesem Bereich Parabeln ergeben, welche mit abnehmendem Wassergehalt flacher werden (Abb.9). Für konstanten Koksanteil erhält man durch partielle Differentiation die Ableitung

$$\frac{\partial y}{\partial h} = 510\,k^3 - 485\,k^2 + 191\,k + 33.$$

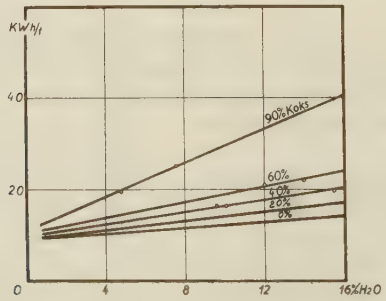


Abb.10. Spezifische Zusatzarbeit in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit des Brennstaubes b. versch.Mischungen.

In Abhängigkeit vom Wassergehalt ist der Zuwachs bei gleichbleibendem Koksgehalt konstant. Im rechtwinkligen Koordinatensystem ergibt diese Funktion ein Strahlenbündel, welches mit zunehmendem Wassergehalt auseinanderläuft (Abb.10). Man erkennt, dass die Steigung der Geraden für grösseren Koksanteil wesentlich stärker ist, als für geringen. Die Gerade für Braunkohle (k = 0) steigt z.B. von 9,2 kWh/t bei h = 0 auf 14,5 kWh/t bei 16% Feuchtigkeit, sodass die Zunahme 58% beträgt. Die Gerade für 90% Koksanteil dagegen steigt in demselben Feuchtigkeitsbereich von 11 auf 41,5 kWh/t oder um 277%.

Zur besseren Uebersicht kann man die eingangs aufgestellte Gleichung für die Zusatzarbeit in derselben Weise umformen wie diejenige für die Gesamtarbeit. Man erhält dann

$$A_Z = h\,(K_1 + B_1) + K_2 + B_2 \text{ kWh/t},$$

worin h den Einfluss des Wassergehaltes im Brennstaub, K_1 und K_2 die Funktion des Koksgehalts und B_1 und B_2 den Anteil der Braunkohle darstellen.

Es bedeuten:

h = Feuchtigkeit d.Brennstaubes in Hundertsteln

$K_1 = 510\ k^3 - 485\ k^2 + 191\ k$
$K_2 = 2\ k$
$B_1 = 33$
$B_2 = 9{,}2.$

Verschleiss der Mühle. Da einerseits die Kosten für die Reparaturen der Kohlenstaubmühlen einen wesentlichen Anteil der Mahlkosten ausmachen, andererseits infolge der Härte des Mahlgutes ein hoher Verschleiss der Mühle zu erwarten war, wurde trotz der technischen Schwierigkeiten, die eine Demontage der Mühle verursacht, der Verschleiss untersucht. Durch Wägung der Walzen und des Mahlringes am Anfang und am Schluss der Versuche wurde der Gewichtsverlust festgestellt, der bei der Vermahlung eines durchschnittlichen Brennstoffgemisches von 60% Koks und 40% Braunkohle entstanden war. Es zeigte sich (Zahlentafel 3), dass der Verschleiss in vorstehendem Falle 4 mal so gross war als bei der Vermahlung von Steinkohle. Da durch das Leerlaufen der Mühle am Anfang und Schluss eines jeden Versuches der Verschleiss ungewollt vergrössert wurde, soll erst für einen Koksanteil von 90% der vierfache Betrag in Rechnung gestellt werden. Als Material für Walzen und Mahlring wurde Manganstahl verwendet, der nach der Aufzeichnung des Kraftwerkes von allen anderen Materialien die grösste Lebensdauer aufweist, aber auch hoch im Preise steht.

Vergleich mit den Ergebnissen von Rosin. An Hand vorstehender Versuchsergebnisse konnte die Leistung und der Arbeitsbedarf der Mühle bei konstanter Mahlfeinheit ermittelt und in Abhängigkeit von zwei variablen Grössen, der Brennstoffmischung und der Feuchtigkeit dargestellt werden.

Zahlentafel 3.

Gewichtsverlust d. Walzen und des Mahlringes beim Vermahlen einer durchschnittlichen Brennstoff-Mischung von 40% Koks u. 60% Braunkohle.			Gewichtsverlust der Walzen und des Mahlringes beim Vermahlen von Steinkohle.		
Gewichtsverlust	kg.	g/t.	Gewichtsverlust	kg.	g/t.
Mahlring	6,7	203	Mahlring	112,8	52,8
Antriebswalze	0,0	0	Antriebswalze	29,5	13,8
Aufgabewalze	3,1	94	Aufgabewalze	34,8	16,4
Hintere Walze	3,4	103	Hintere Walze	26,3	12,3
Ges. Gewichtsverl.	13,2	400	Ges. Gewichtsverl.	203,4	95,3
Ges. Durchsatz.	33,14 t.		Ges. Durchsatz.	2135 t.	

Gewichtsverlust der Maxecon-Mühle.
(Ring und Walzen aus Manganstahl.)

Um einen Vergleich dieser Ergebnisse mit den von Rosin gefundenen Werten für die Vermahlung von Steinkohle zu ermöglichen, soll im folgenden gezeigt werden, wie sich der Arbeitsbedarf für eine konstante Mischung und bei konstanter Mahlfeinheit in Abhängigkeit von der Leistung und Feuchtigkeit verhält (Abb.11).

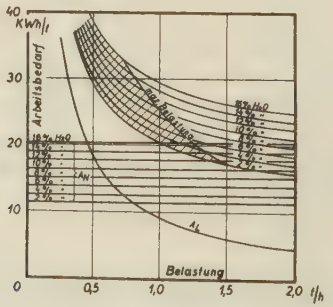


Abb.11. Zusammenhang zwischen Arbeitsbedarf, Belastung u. Feuchtigkeit des Brennstaubes für ein Gemisch aus 60 v.H. Braunkohle u. 40 v.H. Koks.

Die Leerlaufarbeit A_L ergibt sich aus der Gleichung

$$A_L = \frac{N_L}{D} .$$

N_L beträgt für vorliegende Versuche 9 kW und D entspricht der Belastung, die auf der Abzisse aufgetragen ist. Die Zusatzarbeiten A_N, welche zur Abzisse parallel verlaufen, da sie bei gleich bleibender Feuchtigkeit des Brennstaubes für jede Belastung konstant sind, wurden dem Kurvenblatt 10 entnommen. Aus der Summe der Zusatzarbeit und Leerlaufarbeit ergeben sich die Kurven für die Gesamtarbeit, welche in vorliegendem Falle für eine Mahlfeinheit von 24% (4 900) Gültigkeit haben.

Ein Vergleich dieser Kurven mit dem Schaubild, das Rosin für die Mahlbarkeit von Steinkohle entworfen hat[5], zeigt, dass einerseits der charakteristische Verlauf der Kurven in beiden Fällen gleich ist, andererseits der Arbeitsbedarf für Koksgrus erheblich denjenigen für Steinkohle übersteigt.

b) Förderarbeit

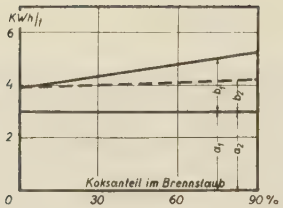
Auf dem Wege vom Rohkohlenbunker zum Kesselhausbunker durchläuft der Brennstoff ein weit verzweigtes System von Förderschnecken und Becherwerken, das je nach dem Aufbau der Mahlanlage mehr oder weniger kompliziert ist. Es zerfallen somit die Förderarbeiten in eine Reihe von Einzelarbeiten, die bei jedem Versuch ermittelt und in zwei Gruppen zusammengefasst wurden:

1. Förderarbeiten für die Aufbereitung des Brennstoffes
2. Förderarbeiten für den Transport des Fertigstaubes zum Kesselhaus (pneumatische Förderarbeiten).

Förderarbeiten für die Aufbereitung. Die Gruppe 1 enthält die Förderarbeiten für den Transport der Rohkohle vom Kohlenbunker zur Mühle (Kurve a_1 und a_2, Abb.12, Zahlentafel 4) und die Arbeiten für die Förderung des fertigen Brennstaubes zum Staubsilo in der Kohlenmahlanlage (Kurve b_1 und b_2). Aus dem Verlauf der Kurven ergibt sich, dass die spezifischen Förderarbeiten mit besserwerdender Mahlbarkeit des Brennstoffgemisches, d.h. mit abnehmendem Koks- und Wassergehalt kleiner werden. Diese Abhängigkeit ist insofern erklärlich, als mit besserer Mahlbarkeit auch die Leistung der Mühle steigt und dadurch die Förderschnecken und Becherwerke besser ausgenutzt werden als bei einer geringen Mühlenleistung. Eine Ausnahme machen die Förderar-

---

5) Archiv f. Wärmewirtschaft 1927, Heft 4, Seite 110.



Spezifische Förderarb.	Ungetrockn Koks u. ungetr Braunkohle.	Getrockn. Koks u. ungetr Braunkohle
V.Kohlenbunker z. Mühle	a_1	a_2
V.d. Mühle z. Staubsilo	b_1	b_2

Abb.12. Spezifische Förderarbeit für die Aufbereitung in Abhängigkeit von der Brennstaub-Mischung.

beiten für den Transport der Rohkohle, da letztere nicht unmittelbar zur Mühle gefördert, sondern vor der Vermahlung im Puffersilo aufgespeichert wird. Hierdurch wird der Zusammenhang zwischen Mühlen- und Förderleistung aufgehoben, sodass die spezifischen Förderarbeiten (Kurve a_1 und a_2) für alle Brennstoffmischungen konstant bleiben.

Pneumatische Förderarbeiten. Der Brennstaub wurde durch eine Staubpumpe bekannter Konstruktion in der Mahlanlage aufgegeben und durch eine Förderleitung von etwa 50 m Länge dem Kesselbunker zugeführt. Die Förderluft lieferte ein Kompressor, dessen Kraftbedarf zu demjenigen der Staubschnecke addiert worden ist. Es zeigte sich, dass die pneumatischen Förderarbeiten nicht nur von der Mischung, sondern auch von der Feuchtigkeit des Brennstaubes abhängig sind (Abb.13, Zahlentafel 4),

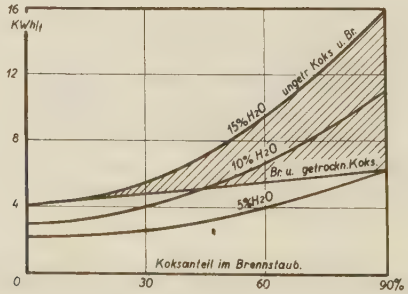


Abb.13. Spez. Arbeit für die pneumat.Förderung d.Brennstaubes z. Kesselhaus in Abhängigk. v.d. Brennstaubmischung.

		A				B			
		Ungetrockneter Koks u. Braunk.				Getrockneter Koks u Braunkohle			
Koksanteil	%	0	40	60	90	0	40	60	90
Förderarbeit vom Kohlenbunker zur Mühle.	KWh/t	3	3	3	3	3	3	3	3
Förderarbeit von der Mühle zum Staubsilo.	KWh/t	0,92	1,53	1,82	2,25	0,92	1,07	1,15	1,25
Gesamte Förderarbeit bei der Aufbereitung.	KWh/t	3,92	4,53	4,82	5,25	3,92	4,07	4,15	4,25
Trocknungsarbeit	KWh/t	—	—	—	—	0	5,07	7,63	11,47
Mahlarbeit	KWh/t	19	31,5	39,5	65	19	26	29	32,5
Pneumatische Förderarbeit	KWh/t	4	6,5	9,5	15,9	4	5	5,5	6,2
Gesamte Aufbereitungsarbeit	KWh/t	26,92	42,53	53,82	86,15	26,92	40,14	46,28	54,42

Aufbereitungsarbeiten für Brennstaubmischungen der Gruppen A und B.

c) Trocknung des Koksgruses

Die Trocknung des Koksgruses erfolgte in einem Dampfröhrentrockner der Maschinenfabrik Buckau von 380 m² Heizfläche, der mit Abdampf von 1,5 atü beheizt wurde und bei der niedrigsten Tourenzahl von 5 Umdr./min. den Koks von 19 bis 20% Wassergehalt auf 5% Restwasser trocknete. Da die getrocknete Koksmenge im Höchstfall nur 3 t betrug, schien es zweifelhaft, ob die gemessenen Daten ein richtiges Bild von der Leistung des Trockners geben würden. Sie wurden daher durch Erfahrungswerte der Lieferfirma ergänzt. Man kann annehmen, dass der Gesamtbedarf an Kraft und Dampf für die Trocknung des Kokses doppelt so hoch ist als für Steinkohle mit 5% Wasser. In Abb.15 (Spalte d) sind die Trocknungsarbeiten in Abhängigkeit vom Koksanteil aufgetragen. Da nur der Koksgrus getrocknet wurde, erreicht die Trocknungsarbeit für 0% Koks d.h. für reine Braunkohle den Wert 0. Um ein einheitliches Bild zu erhalten, wurde der Dampfverbrauch in kWh umgerechnet.

d) Aufzuwendende Gesamtarbeit für die Aufbereitung

Wie in der Einleitung hervorgehoben wurde, sollte der Arbeitsbedarf für die Aufbereitung eines Gemisches

A) aus vorgetrockneter Braunkohle und ungetrocknetem Koks
B) aus vorgetrockneter Braunkohle und getrocknetem Koks

ermittelt werden. Dementsprechend wurden die Teilarbeiten für die Gemische A und B in zwei Abb.14 und 15 zusammengefasst (Zahlentafel 4). Ein Vergleich der Kurven ergibt, dass die Gesamtaufbereitungsarbeiten für die Gemische B niedriger sind als diejenigen für die Gemische A. Die Ersparnis, welche durch die Trocknung des Gaskoks erzielt werden kann, steigt mit zunehmendem Koksgehalt und erreicht für einen Koksanteil von 90% ein Optimum von 37%. Um einen Vergleich mit anderen Brennstoffen zu ermöglichen, sei angeführt, dass die Aufbereitungsarbeit für Steinkohle im vorliegenden Falle 35 kWh beträgt und um 39% geringer ist als die Aufbereitungsarbeit für reinen, getrockneten Koksgrus.

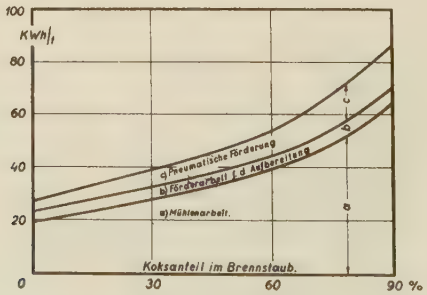


Abb.14. Gesamt-Aufbereitungsarbeit für Brennstoffmischungen aus Braunkohle u. ungetrocknetem Koks.

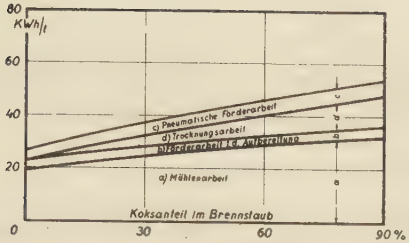


Abb.15. Gesamt-Aufbereitungsarbeit für Brennstoffmischungen aus Braunkohle u. getrocknetem Koks.

III. Zusammenfassung

Es wurden Brennstoffgemische aus Braunkohle und Koksgrus von verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt bei gleichbleibender Mahlfeinheit vermahlen und der Zusammenhang zwischen Mühlendurchsatz, Arbeitsbedarf, Feuchtigkeit und Mischung des Mahlgutes dargestellt. Die Versuche ergaben, dass die Aufbereitung vorstehender Brennstoffgemische zu brennfähigem Staub technisch keine Schwierigkeiten bietet. Ein Vergleich der Aufbereitungsarbeiten für Brennstoffmischungen der Gruppe A und der Gruppe B ergibt, dass durch die Trocknung des Koksgruses eine Arbeitsersparnis bis zu 37% und eine Steigerung des Mühlendurchsatzes bis zu 58% erreicht werden kann, sodass die Aufbereitungskosten durch die Trocknung in doppelter Hinsicht verringert werden:

1. Durch Herabsetzung der Stromkosten,
2. Durch Herabsetzung des Kapitaldienstes.

Die Mahlbarkeit des Koksgruses ist erheblich geringer als diejenige der Steinkohle. Im günstigsten Falle beträgt die gesamte Mühlenarbeit 32 kWh/t für einen Koksanteil von 90% (5% H_2O im Brennstaub) gegenüber 22 kWh/t für Steinkohle (5% H_2O) und die Belastung (0,74 t/h gegenüber 0,9 t/h, sodass die Mahlarbeit für Koksgrus um 46% grösser wird und der Mühlendurchsatz um 18% zurückgeht. Besonders auffallend ist der Unterschied im Verschleiss der Mühle, der für einen Koksanteil von 90% 4 mal so gross wird als für Steinkohle. Im vorstehenden Falle steigen daher die Stromkosten um 46%, die Reparaturkosten um 400% und der Kapitaldienst um 18% gegenüber den entsprechenden Kosten für Steinkohle. Diese Zusammenstellung zeigt, dass die Reparaturkosten für die Wirtschaftlichkeit der Vermahlung von Koksgrus eine ausschlaggebende Rolle spielen.

C. Brenntechnische Eigenschaften des Staubgemisches

I. Brennstoffanalyse

In Zahlentafel 5 sind die Ergebnisse von etwa 20 Brennstoffanalysen, die vom Laboratorium des Kraftwerkes Klingenberg ausgeführt wurden, zusammengestellt. Auffallend ist die schlechte Beschaffenheit des Koksgruses, dessen unterer Heizwert teilweise den der Braunkohle unterschreitet. Da jedoch angenommen werden kann, dass die Gaswerke im Bedarfsfalle einen Koksgrus (19% H_2O) mit einem durchschnittlichen H_u von 5000 kcal/kg anliefern werden, wurde dieser etwas günstigere Wert der Wirtschaftlichkeitsberechnung zugrunde gelegt. Für getrockneten Koksgrus (5% H_2O) wurde unter derselben Voraussetzung ein unterer Heizwert von 6000 kcal/kg ermittelt und für Braunkohle (17% H_2O) ein H_u von 4720 kcal/kg in Rechnung gestellt. Auf dieser Basis war es möglich, auch die Heizwerte der verschiedenen Brennstoffmischungen theoretisch zu bestimmen (Zahlentafel 6, Abb.16).

Zahlentafel 5.

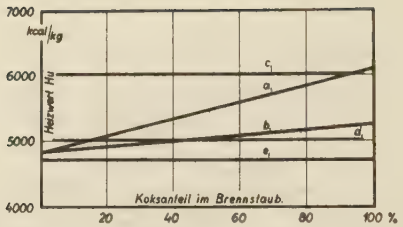
Pos.		Ungetrockneter Koks	Braunkohle
1	Ho	4300 ÷ 5260	5030 ÷ 5125
2	Hu	4059 ÷ 5016	4704 ÷ 4766
3	Asche %	22,50 ÷ 17,68	5,62 ÷ 5,48
4	Wasser %	23,10 ÷ 19,42	16,10 ÷ 14,05
5	Brennbare Substanz %	54,40 ÷ 62,90	78,28 ÷ 80,47
6	Flüchtige Bestandteile %	1,90 ÷ 2,88	44,50 ÷ 45,40

Brennstoffanalysen.

Zahlentafel 6.

A. Brennstaub aus Braunkohle und ungetrocknetem Koks				B. Brennstaub aus Braunkohle u. getrocknetem Koks.			
Koks-anteil %	Ho	Hu	Staub-feuchtigk. % H_2O	Koks-anteil %	Ho	Hu	Staub-feuchtigk. % H_2O
0	5210	4848	15	0	5210	4848	15
40	5310	4996	15,5	40	5630	5340	10,4
60	5380	5091	15,5	60	5850	5596	8,2
90	5470	5216	15,7	90	6180	5986	4,8
100	5480	5245	15,9	100	6300	6120	3,7

Heizwerte der Brennstaubmischungen A u. B



a-Brennstaub aus Braunkohle und getrocknetem Koks.
b-Brennstaub aus Braunkohle und feuchtem Koks.
c-getrockneter Koks.
d-feuchter Koks.
e-Trockenbraunkohle

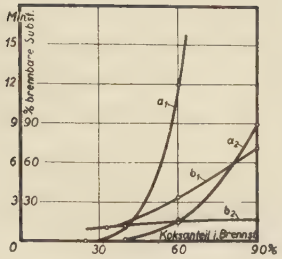
Abb.16. Heizwerte des Brennstaubes in Abhängigkeit von der Mischung und Trocknung.

Hierbei wurde berücksichtigt, dass der Brennstoff durch den Mahlvorgang je nach dem Feuchtigkeitsgehalt um 1 - 2% nachtrocknet. Während die Heizwerte der Brennstoffmischungen der Gruppe A infolge des geringen Heizwertes des feuchten Koksgruses nur wenig mit zunehmendem Koksgehalt ansteigen (Kurve b), ergibt sich für die Gruppe B eine wesentliche Verbesserung der Heizwerte (Kurve a), da der Heizwert des Koksanteiles durch die Trocknung um 20% gesteigert wird.

II. Zündfähigkeit

Die Entzündbarkeit des Kohlenstaubes in der Brennkammer ist nicht nur in brenntechnischer Hinsicht von Bedeutung, sondern auch ausschlaggebend für die Betriebsbereitschaft des Dampfkessels. Unter der Voraussetzung, dass der Brennstaub beim Anfahren des Kessels sofort zündet, kann ein Kohlenstaubkessel, der in Reserve liegt, in ca. 1/2 Stunde zur Dampflieferung herangezogen werden. Unsere Aufgaben erstreckten sich daher einerseits auf die Ermittlung der Zeit, die der Brennstaub zur Zündung in der kalten Brennkammer benötigt, andererseits auf die Untersuchung seiner Brenneigenschaften.

Da die Zündung des Brennstaubes im Versuchskessel durch Oelbrenner eingeleitet wurde, konnte jederzeit durch Auslöschen der Oelbrenner ermittelt werden, ob der Staub selbständig weiter brannte und somit gezündet hatte. Als Zündzeit wurde die gesamte Brennzeit der Oelbrenner in Rechnung gestellt. Um einwandfreie Vergleichswerte zu erhalten, wurden die Zeitabstände für das Anzünden und Auslöschen der Oelbrenner und für das Ein- und Ausschalten der Staubbrenner für alle Versuche einheitlich festgelegt. Die Versuchsergebnisse, welche in zwei Gruppen A und B zusammengefasst wurden,



a_1 Zündzeiten für Brennstaubmischungen aus Braunkohle u. ungetrocknetem Koks.
a_2 Zündzeiten für Brennstaubmischungen aus Braunkohle und getrocknetem Koks.
b_1 Brennbare Substanz in der Asche beim Zündversuch a_1.
b_2 Brennbare Substanz in der Asche beim Zündversuch a_2.

Abb. 17. Zündfähigkeit der Brennstaubmischungen.

geben ein anschauliches Bild über die Zündfähigkeit der Brennstaubmischungen (Abb. 17, Zahlentafel 7). Während die Kurve a_1 für die Zündzeiten der Gruppen A (Braunkohle und

Zahlentafel 7.

		A Braunkohle und ungetrockneter Koks			B Braunkohle und getrockneter Koks.		
Versuch Nr.	Koks-anteil %	Brenn-staub-feuchtigk. % H_2O	Rückstand auf Sieb 10000 %	Zünd-zeiten. Min.	Brenn-staub-feuchtigk. %	Rückstand auf Sieb 10000 %	Zünd-zeiten. Min.
1	25	15,2	49,4	0,08	—	—	—
2	40	15,5	40,0	1,00	10,07	44,2	0,17
3	60	13	42,8	12,00	8,56	49,4	1,50
4	90	15,5	72,1	brennt nicht	4,82	40	9,00

Zündzeiten in Abhängigkeit von den Brennstaubmischungen der Gruppen A und B.

ungetr. Koks) mit zunehmendem Koksgehalt parabelförmig ansteigt und bei einem Koksanteil von 90% einen unendlichen Wert erreicht, liegt die Kurve a_2 der Gruppe B (Braunkohle und getr. Koks) wesentlich niedriger, sodass für einen Koksanteil von 90% noch ein endlicher Wert erreicht wird. Hieraus ergibt sich, dass feuchter Brennstaub (15% H_2O) mit einem Koksanteil von 90% in einer kalten Brennkammer überhaupt nicht zum Zünden gebracht werden kann, dagegen trockener Brennstaub (5% H_2O) derselben Mischung nach 9 Minuten zündet. Interessant ist die Feststellung, dass alle Brennstaubgemische mit niedrigem Koksanteil (bis zu 33%) eine gute Zündung ergeben und somit der Koksanteil dieser Mischungen für die Zündung ohne Bedeutung ist.

Um einen weiteren Anhalt für die Zündfähigkeit der Brennstaubgemische zu erhalten, wurde den während des Zündversuches anfallenden Rückständen eine Durchschnittsprobe entnommen und auf brennbare Substanz untersucht. In Abb.17 (Zahlentafel 8) sind die Ergebnisse für die Brennstaubmischungen der Gruppen A und B eingetragen (Kurve b_1 und b_2). Da ein feuchter Brennstaub mit einem Koksanteil von 90% in der kalten Brennkammer nicht zündet, enthält die Durchschnittsprobe der Rückstände in diesem Falle 72% brennb. Substanz d.h. unverbrannten, getrockneten Koks. Mit abnehmendem Koksgehalt wird der Ausbrand besser, und bei einem Koksanteil von 33% ist es gleichgültig, ob der Koks getrocknet wird oder nicht. Man kann somit annehmen, dass dieser Punkt für die Zündfähig-

Zahlentafel 8.

		A Braunkohle und ungetrockneter Koks			B Braunkohle und getrockneter Koks.		
Versuch Nr	Koks-anteil %	Brenn-staub feuchtigk. % H_2O	Rückstand auf Sieb 10000 %	Brennbare Substanz i.d. Schlacke %	Brenn-staub-feuchtigk. % H_2O	Rückstand auf Sieb 10000 %	Brennbare Substanz i.d. Schlacke %
1	33	15,6	42,5	10,4	—	—	—
2	40	15,5	40,0	13,8	7,01	44,4	11,7
3	60	13	42,8	34,3	8,6	49,4	16,43
4	90	15,5	72,1	71,6	4,83	40	16,5

Brennbare Substanz in der bei den Zündversuchen anfallenden Schlacke.

keit von Brennstaubmischungen aus Braunkohle und Koks einen Wendepunkt darstellt, dergestalt, dass unterhalb 33% Koksgehalt die Einwirkung des Kokses verblasst, oberhalb dieses Punktes der hemmende Einfluss des Kokses in Erscheinung tritt.

III. Ausbrand

Vorstehende Zahlen über die brennbare Substanz in den Rückständen, die bei den Zündversuchen in der kalten Brennkammer angefallen waren, geben noch keinen Aufschluss über den Ausbrand, der bei fortlaufendem Betriebe erreicht werden kann. Um hierfür einige Anhaltspunkte zu gewinnen, wurden in kurzen Zeitabständen Ascheproben entnommen und fortlaufend auf brennbare Substanz analysiert. Das Ergebnis zeigt (Abb.18), dass die brennbare Substanz in der Asche bereits nach einer Anlaufzeit von 60 Minuten einen konstanten Wert erreichte, im vorliegenden Falle 1,7 - 2,25% für ein Gemisch von 90% Koks und 10% Braunkohle. Hieraus kann gefolgert werden, dass die Verbrennung des trockenen Koksstaubes im Dauerbetriebe keine Schwierigkeiten bereiten wird, selbst wenn die Feinheit wie im vorliegenden Falle nur 24 (4 900) betragen sollte.

IV. Flammentemperatur

Die Untersuchungen der Staubflamme ergaben, dass die höchsten Flammentemperaturen (1380°C) bei der Verfeuerung einer Brennstaubmischung mit einem Anteil von 90% getrocknetem Koks erreicht werden konnten. Dementsprechend war auch die Kesselleistung für vorstehende Mischung am grössten. Da die Flammentemperatur bei konstantem Luftüberschuss vom Wassergehalt und Heizwert des Brennstaubes abhängig ist und letztere für das oben angeführte Gemisch ein Optimum erreichen (Zahlentafel 6), stehen die Ergebnisse mit der Verbrennungstheorie im Einklang.

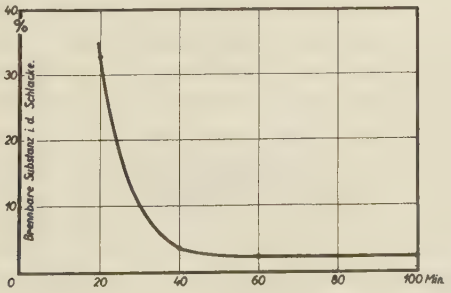


Abb.18. Brennbare Substanz in der Schlacke in Abhängigkeit von der Brenndauer. Brennstaub: 90% Koks, 10% Braunkohle, 4,82% H_2O. Mahlfeinheit 24% (4 900).

V. Brennpunktbestimmung

Zur Vervollständigung des Bildes, das man aus den vorstehenden Zünd- und Brennversuchen gewinnt, seien die Ergebnisse angeführt, die aus planmässig durchgeführten Laboratoriumsversuchen gewonnen wurden und der Bestimmung des Brennpunktes dienten[6]).

a) Brennpunktsmesser

Die Bestimmung des Brennpunktes der aus den Mahlversuchen gewonnenen Brennstaubmischungen erfolgte in einer Apparatur, die vom Bearbeiter selbst entworfen und u.a. auch zur Untersuchung des Verhaltens vom Kohlenstaub im Ozonstrom benutzt wurde. Die Ergebnisse der Ozonbrandversuche werden an anderer Stelle veröffentlicht werden. Im vorliegenden Falle interessiert die Verbrennung der Staubmischungen aus Braunkohle und Koksgrus im Luftstrom.

Einen Einblick in die Konstruktion des Brennpunktsmessers gewährt Abb.19. Er besteht aus einem elektrisch beheizten Ofen, welcher eine Brennkammer B enthält, die so eingerichtet ist, dass der Brennstaub im Luftstrom selbsttätig zündet und verbrennt. Der Zwischenraum zwischen der Brennkammer und der Innenwand des elektrischen Ofens ist mit gebrannten Schamottestücken H ausgefüllt. Es wird dadurch ein langsames Ansteigen der Temperaturkurve ohne Aenderung des Heizstromes ermöglicht und eine Kompensation der Spannungsschwankungen angestrebt. In der Brennkammer befindet sich das Messrohr J, das an seinem unteren Ende die Messkapsel D trägt. Diese dient zur Aufnahme der Kohlenstaubprobe C, die auf ein feinmaschiges Sieb L aus Phosphorbronze aufgebracht wird. Im Messrohr befindet sich oberhalb des Kohlenstaubes noch ein zweites gleichartiges Sieb, um ein Uebertreten der feinen Staubteilchen in den Abgasstrom zu verhindern. In den Kohlenstaub taucht die Lötperle M eines Thermoelementes ein, dessen Drähte durch Kapillaren aus Bergkristall und durch ein Rohr aus Marquardt'scher Masse O isoliert und gegen Oxydation geschützt sind. Das Marquardtrohr wird durch eine Stopfbüchse mit Asbestdichtung festgehalten, um den Wärmeübergang an der Befestigungsstelle nach Möglichkeit zu beschränken. An der Aussenseite des Messrohres J befindet sich ein zweites Thermoelement N, mit dem die Heizkurve des Ofens aufgenommen wird. Die freien Enden beider Thermoelemente Th sind zwischen Asbestplatten isoliert herausgeführt, und alle aus dem Ofen herausragenden Metallteile sind durch Isolation mit geflochtener Asbestschnur gegen Wärmeverluste geschützt. Durch den Stutzen A tritt die Verbrennungsluft in den Ofen ein, und durch das Ansatzrohr G werden die Abgase dem Rauchgasprüfer zugeführt.

---

6) Dem Laboratoriumsleiter, Herrn Dr. Richter, sei auch an dieser Stelle für die entgegenkommende Unterstützung aufrichtig gedankt.

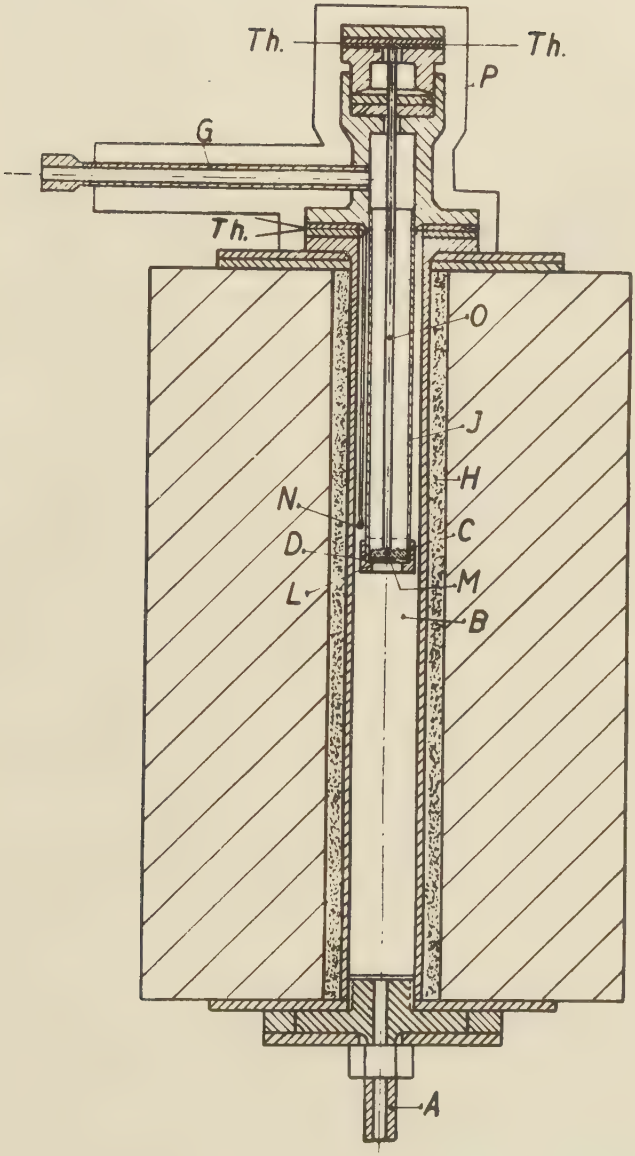


Abb. 19. Brennpunktsmesser.

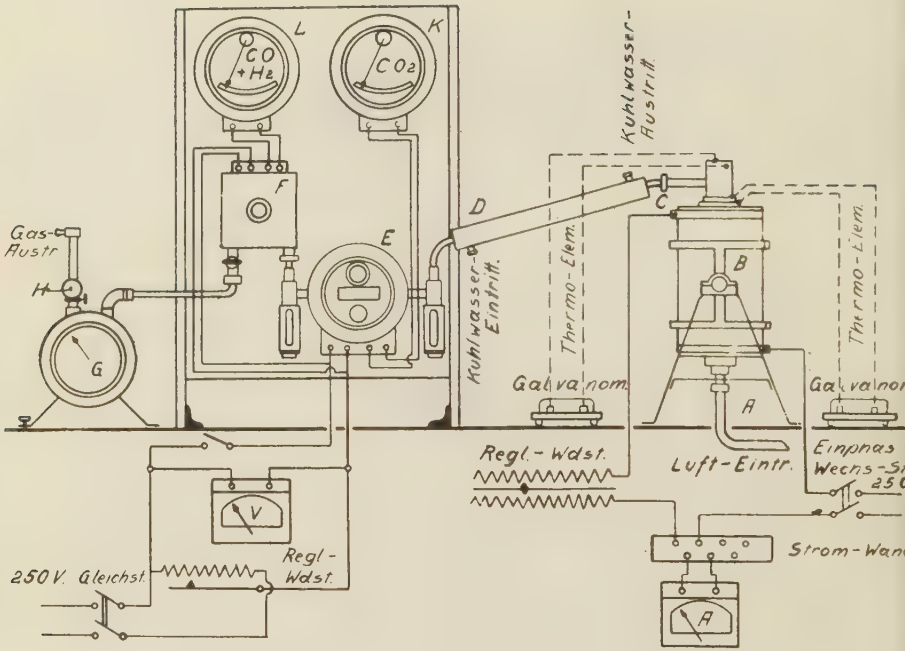


Abb. 20. Schaltungsschema des Brennpunktsmessers.

b) Schaltung der Versuchsanlage

Die für die Verbrennung der Kohlenstaubprobe erforderliche Luftmenge wird durch einen Ventilator in die Apparatur gedrückt und tritt bei A (Abb.20) in den Brennpunktsmesser B ein. Die Abgase werden durch das Ansatzrohr C abgeführt und durch den Kühler D auf Zimmertemperatur abgekühlt. In den Messkammern E und F wird der Kohlensäure- und Oxydgehalt der Abgase auf elektrischem Wege gemessen, und mit der Gasuhr G, die zur Regulierung der Gasmenge mit einer Drosselklappe H versehen ist, die eingeführte Luftmenge kontrolliert. Der Kohlensäure- und Oxydgehalt der Rauchgase kann unmittelbar an den elektrischen Anzeigeinstrumenten K und L abgelesen werden.

c) Instrumente

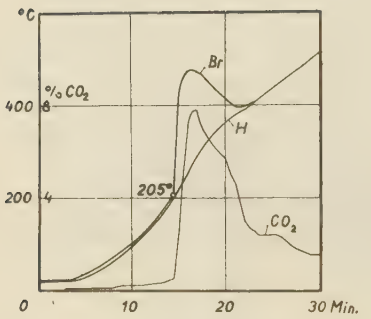
Zur Temperaturmessung werden zwei Thermoelemente aus Platin-Platinrhodium verwendet, die mittels eines Normalthermometers von der P-T-Reichsanstalt im Thermostaten geeicht und an zwei Galvanometer mit Spitzenlagerung von S. & H. angeschlossen sind. Der Kohlensäure- und Kohlenoxydgehalt der Abgase wird durch einen Siemens-Rauchgasprüfer bestimmt, welcher durch eine Reihe von Vorversuchen geeicht ist. Seine Anzeigeverzögerung beträgt 20 sek., und eine Prüfung der Empfindlichkeit ergab, dass noch ein Kohlensäuregehalt von 0,2% abgelesen werden kann.

d) Ausführung der Versuche

Zur Untersuchung der Brennpunkte wurde jeweils eine Probe von 0,5 g der Brennstaubmischungen aus Braunkohle und Koks in die Messkapsel des Brennpunktsmessers eingebracht und in einem Zeitraum von etwa 10 Minuten verbrannt. Die für die Verbrennung erforderliche Luftmenge betrug 0,38 l/min und wurde in allen Fällen konstant gehalten. Die Ablesung der Instrumente erfolgte in einem Zeitabstande von 30 sek., sodass eine Genauigkeit der Brennpunkts-Ermittlung von 3% erreicht werden konnte.

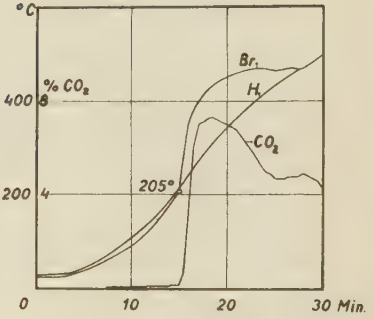
e) Ergebnis

Die Abbildungen 21 - 26 enthalten jeweils drei Kurven, welche die Temperaturen des Brennstaubes, der Brennkammer und die Kohlensäureentwicklung veranschaulichen. Die Temperaturen des Brennstaubes und der Brennkammer betragen im Anfang etwa 200C und steigen zunächst gleichmässig an, sodass die beiden Kurven sich nahezu decken; dann erfolgt die explosionsartige Verbrennung des Kohlenstaubes und die Brennkurve biegt in einem Knick nach oben ab. In demselben Augenblick steigt auch der Kohlensäuregehalt der Abgase, sodass in der CO_2-Kurve ebenfalls ein scharfer Knick entsteht, der eine Kontrolle des Brennpunktes ermöglicht.



Br- Brennkurve des Kohlenstaubes.
H - Heizkurve der Brennkammer.
CO_2-Kohlensäuregehalt der Abgase.

Abb.21. Bestimmung des Brennpunktes. Brennstaubmischung: 17% Koks, 83% Braunkohle und 15% H_2O.



Br= Brennkurve des Kohlenstaubes.
H = Heizkurve der Brennkammer.
CO_2= Kohlensäuregehalt der Abgase.

Abb.22. Bestimmung des Brennpunktes. Brennstaub: 33% Koks, 67% Braunkohle und 15,6 H_2O.

Bei der Betrachtung der Kurvenblätter ergeben sich zunächst zwei grundsätzliche Unterschiede zwischen den Schaubildern 21 - 22 und 23 - 26. Während die ersteren nur einen Brennpunkt enthalten, ergeben sich aus den letzteren für jede Mischung zwei Brennpunkte. Dieser Unterschied ist im Koksgehalt der Mischung begründet. Je weniger Koks die Mischung enthält, desto eher besteht die Möglichkeit, dass der Koks in der Braunkohlenflamme mit verbrannt wird und das gesamte Gemisch einen einheitlichen Brennpunkt aufweist. Für Brennstaubmischungen mit einem Koksanteil bis zu 33% (Zahlentafel 9) tritt somit der Idealzustand ein, dass der Brennpunkt der Mischung auf denjenigen der Braunkohle (205°C) erniedrigt wird. Hierdurch wird es erklärlich, dass bei den Zündversuchen in der Brennkammer die Brennstaubmischungen bis zu einem Koksanteil von 33% eben so leicht zündeten wie reine Braunkohle. Bei höheren Koksanteilen dagegen ergeben sich für Braunkohle und Koks zwei getrennte Brennpunkte, da die Heizkraft der Braunkohlenflamme in diesem Falle nicht mehr ausreicht, um den Koksstaub zu verbrennen (Abb.25). Zwischen diesen beiden Grenzfällen gibt es einen Uebergang, wenn die Brennstoffe so gemischt sind, dass die Heizkraft der Braunkohlenflamme gerade noch ausreicht, um den Koksstaub zu entzünden (Abb.23). Das Verhältnis, in dem die beiden Brennstoffe gemischt sind, spiegelt sich in den Flächen der beiden Spitzen des CO_2-Diagramme wieder. Bei der Verbrennung einer Brennstaubmischung aus 40% Koks und 60% Braunkohle (Abb.23) ist der Kohlensäureanteil der Braunkohle erheblich

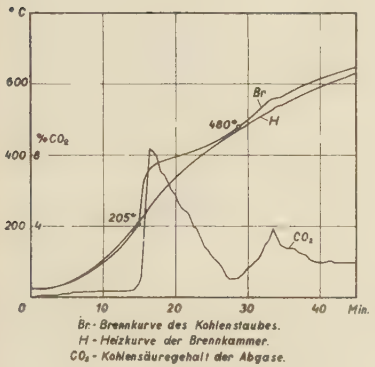


Abb.23. Bestimmung des Brennpunktes. Brennstaubmischung: 40% Koks, 60% Braunkohle u. 10,2% H_2O.

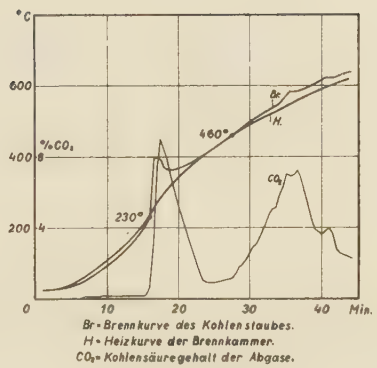


Abb.24. Bestimmung des Brennpunktes. Brennstaubmischung: 60% Koks, 40% Braunkohle u. 8,56% H_2O.

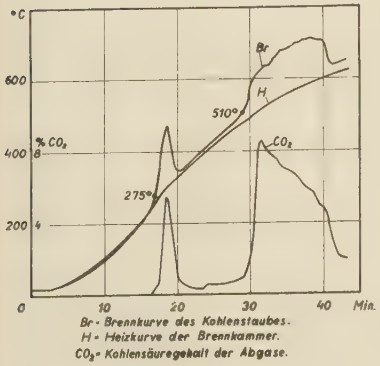


Abb.25. Bestimmung des Brennpunktes. Brennstaubmischung: 90% Koks, 10% Braunkohle u. 7,6% H_2O.

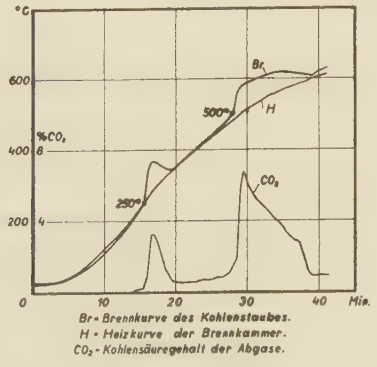


Abb.26. Bestimmung des Brennpunktes. Brennstaubmischung: 90% Koks, 10% Braunkohle u. 15,5% H_2O.

Zahlentafel 9.

Versuch Nr	Koksanteil %	Brennstaubfeuchtigkeit % H_2O	Rückstand auf Sieb 900 %	Rückstand auf Sieb 10000 %	Brennpunkt °C Braunkohle	Brennpunkt °C Koks	Oberer Heizwert kcal/kg	Asche %	Flüchtige Bestandteile %	Brennbare Substanz %
1	17	15,1	1,3	—	205	—	5180	7,64	37,64	75
2	25	15,2	0,9	49,4	205	—	5260	12,09	30,07	72,73
3	28	13	0,7	42,4	205	—	5364	11,19	29,67	75,78
4	33	15,6	0,3	42,5	205	—	5310	11,38	27,30	73,02
5	40	10,07	0,7	44,2	205	480	5620	11,40	28,03	78,53
6	60	14	0,3	44,3	210	500	5700	11,46	21,05	74,59
7	60	8,56	2,5	49,4	210	465	5770	13,66	19,84	77,78
8	60	8,56	2,5	49,4	230	460	5770	13,66	19,84	77,78
9	90	15,5	4,0	72,1	250	500	5500	16,56	6,35	67,99
10	90	15,5	4,0	72,1	250	530	5500	16,56	6,35	67,99
11	90	11,9	6,8	57,5	260	510	5620	16,31	10,04	71,78
12	90	9,50	0,3	50,2	260	495	5730	18,67	22,91	71,83
13	90	7,55	0,3	44,4	250	510	5915	18,12	18,71	74,33
14	90	6,12	1,3	59,7	260	495/600	6030	15,70	15,05	78,18
15	90	4,82	0,6	40	275	495/605	6100	17,70	8,17	77,48

grösser als derjenige des Kokses; für eine Mischung von 90% Koks und 10% Braunkohle dagegen liegen die Verhältnisse umgekehrt (Abb.25). Der Einfluss der Trocknung des Brennstaubes äussert sich in einer gesteigerten Verbrennungstemperatur und CO_2-Entwicklung (Abb.25 und 26). Im Gegensatz zum Koks, der als Abfallprodukt von schwankender Zusammensetzung keinen einheitlichen Brennpunkt aufweist (Zahlentafel 9), hat die Braunkohle einen Brennpunkt, der gut reproduzierbar ist. Da der Koksanteil einen Teil der Wärme, welche die Braunkohle nach der Entzündung entwickelt, aufzehrt, wird die Verbrennung mit zunehmendem Koksanteil verzögert und der Brannpunkt der Braunkohle hinaufgesetzt.

VI. Zusammenfassung

Die Zündfähigkeit des Koksstaubes kann durch Beimischung von Braunkohlenstaub und durch Trocknung gesteigert werden. Sofern der Koksanteil der Brennstaubmischung 33% nicht übersteigt, zündet das Gemisch ebenso leicht wie reiner Braunkohlenstaub. Die Trocknung des Koksgruses empfiehlt sich auch in brenntechnischer Hinsicht, da sie den Heizwert und damit die Kesselleistung wesentlich steigert.

D. Wirtschaftlichkeit der Verfeuerung von Koksgrus und Braunkohle in Staubform

Für die Wirtschaftlichkeit der Verfeuerung von Koksgrus sind folgende Faktoren massgebend: Wirkungsgrad der Feuerung, Herstellungskosten des Brennstaubes und Kokspreis.

Da aus dem Ergebnis der Zündversuche folgert, dass die zur Entzündung des Koksstaubes erforderlichen Temperaturen in der Brennkammer erreicht werden und der Ausbrand zufrieden stellen wird, kann angenommen werden, dass der Wirkungsgrad der Feuerung durch die Verbrennung von Koksstaub kaum beeinträchtigt werden wird. Diese Voraussetzung hat jedoch streng genommen nur für eine Brennkammer ohne wassergekühlte Wandflächen Gültigkeit, da die Versuche nur mit einer solchen ausgeführt wurden.

Im vorliegenden Falle ist also die Wirtschaftlichkeit von den Herstellungskosten des brennfertigen Staubes und den Brennstoffkosten frei Kraftwerk abhängig. Mit den ersteren sind diejenigen Kosten gemeint, welche vom Ausladen der Kohle angefangen, bis zur Bunkerung des brennfertigen Staubes im Kesselhaus entstehen. Sie werden zweckmässig in zwei Gruppen unterteilt, nämlich in Umschlagkosten für die Förderung und Stapelung des angelieferten Brennstoffs und Aufbereitungskosten für die Trocknung, Vermahlung und Staubförderung.

I. Aufbereitungskosten für die Brennstoffmischungen A und B

Aus der Zahlentafel 10 ist ersichtlich, dass die Aufbereitungskosten in erster Linie durch zwei Faktoren beeinflusst werden, durch den Kapitaldienst und durch die Reparaturkosten der Mühlen (Konto E und C_2). Wie nach den Ergebnissen des Abschnittes B zu erwarten war, vergrössern sich beide Konten mit abnehmender Mahlbarkeit der Brennstoffmischungen. Ein Vergleich der Aufbereitungskosten für die Mischungen A und B ergibt beispielsweise (Abb.27), dass die Kosten für die Aufbereitung von Gemischen aus Braunkohle und ungetrocknetem Koks bei einem Koksanteil von mehr als 25% grösser sind als diejenigen für Braunkohle und getrocknetem Koks. Bei der Aufbereitung ungemischten Koksgruses (100% Koksanteil) bewirkt z.B. die Trocknung von 19% auf 5% H_2O eine Kostenminderung von 20,60 RM auf 12 RM, so dass die Aufbereitung des getrockneten Koksgruses um 42% billiger wird. Damit ist die Rentabilität der Trocknung des Koksgruses für Gemische mit hohem Koksanteil erwiesen. Für

Zahlentafel 10.

Konto	Brennstoff		A. Braunkohle u. ungetrock. Koks			B. Braunkohle u. getrockneter Koks				
	Mischungsverhältnis		Koks in o/o 40	60	90	0	40	60	90	100
	Spezifische Kosten		RM/t	RM/t	RM/t	RM/t	RM/t	RM/t	RM/t	RM/t
A	Betriebsbedarfsmittel	Strombedarf	1,71	2,15	3,44	1,08	1,40	1,55	1,72	1,76
		Schmiermittel	0,46	0,70	1,10	0,27	0,37	0,44	0,47	0,49
		Trocknung	-	-	-	-	0,20	0,31	0,46	0,51
B	Gehälter u. Löhne für den reinen Betrieb	Gehälter u. Löhne	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
C	Unterhaltungs- u. Instandsetzungskosten	Gebäude	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
		Maschinenanl.	2,53	3,30	4,40	1,10	2,53	3,30	4,40	4,72
D	Verwaltungs- u. allgemeine Unkosten	Gehälter u. Löhne	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
E	Kapitaldienst	20 % Masch. 3 % Gebäude 8 % Zinsend.	3,68	5,52	8,70	2,13	2,94	3,62	3,73	3,73
F	Aufbereitungskosten	Summe	9,11	12,40	18,37	5,31	8,17	9,95	11,51	11,94

* für Mühlen u. Fördereinrichtungen.

Aufbereitungskosten für die Brennstoffmischungen A u. B

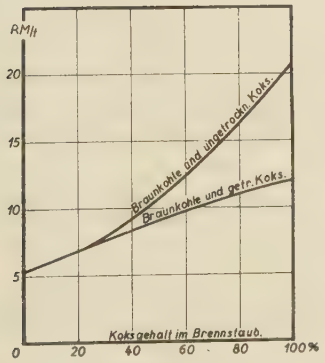


Abb. 27. Aufbereitungskosten für Brennstaubmischungen aus Braunkohle und Koks in RM/t.

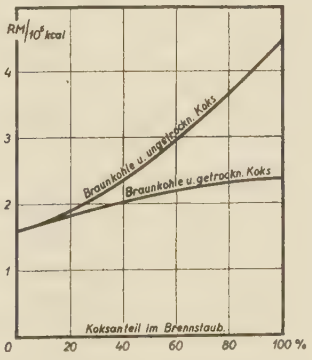


Abb. 28. Herstellungskosten für 10^6 kcal im Brennstaub. (Vom Ausladen der Kohle bis zum Kesselhaus)

Gemische, die weniger als 25% Koks enthalten, ist es hinsichtlich der Aufbereitungskosten pro t Brennstaub gleichgültig, ob der Koksgrus getrocknet wird oder nicht, da in diesem Falle die Mahlbarkeit der Braunkohle den Ausschlag gibt. Berücksichtigt man jedoch den Heizwert des Brennstaubes, so ergibt sich (Abb.28), dass auch in diesem Falle die Trocknung vorteilhaft ist.

II. Umschlagkosten

Die anteiligen Kapital- und Betriebskosten für das Ausladen, Stapeln und für den Transport des Brennstoffes zur Mahlanlage seien sowohl für Braunkohle als auch für Koksgrus mit 2,56 RM/t angenommen (Zahlentafeln 11).

Zahlentafel 11.

Brennstoffgemisch	A. Braunkohle u. ungetrockn. Koks			B. Braunkohle u. getrockn. Koks				
Koksanteil %	40	60	90	0	40	60	90	100
Aufbereitungskosten RM/t	9,11	12,40	18,37	5,31	8,17	9,95	11,51	11,94
Umschlagskosten RM/t	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Herstellungskosten RM/t	11,67	14,96	20,93	7,87	10,73	12,51	14,07	14,50
Heizwert Hu des. Brennst. kcal/kg	4996	5091	5216	4848	5340	5596	5986	6000
Herstellungskosten für 10^6 kcal im Brennstaub RM/10^6 kcal	2,34	2,94	4,01	1,62	2,01	2,24	2,35	2,42

Herstellungskosten für die Brennstaubmischungen A u. B in RM/10^6 kcal

III. Herstellungskosten des Brennstaubes

Aus der Summe der Aufbereitungs- und Umschlagkosten ergeben sich nunmehr die Herstellungskosten für brennfertigen Staub. Sie sind in Abb.28 (Zahlentafel 11) für die Brennstoffmischungen A und B getrennt dargestellt und mit Rücksicht darauf, dass für die Verfeuerung nicht das Gewicht, sondern der Heizwert ausschlaggebend ist, auf 10^6 kcal im Brennstaub umgerechnet.

IV. Was darf 1 t Koksgrus und 1 t Braunkohle dem E - Werk kosten?

Der Anlieferungspreis für 1 t Koksgrus wird angesichts der erhöhten Kosten für die Vermahlung und des geringeren Heizwertes erheblich niedriger sein müssen als derjenige für Steinkohle, wenn seine Verfeuerung wirtschaftlich sein soll. Zur Ermittlung desjenigen Preises, bei dem die Koksstaubfeuerung mit der Steinkohlenstaubfeuerung in Wettbewerb treten kann, seien die Kosten für brennfertigen Steinkohlenstaub herangezogen. Nimmt man an, dass letztere im mitteldeutschen Industriegebiet etwa 4 RM pro 10^6 kcal betragen und subtrahiert man hiervon die vorstehend ermittelten Herstellungskosten der Brennstaubgemische aus Braunkohle und Koks, so erhält man die in Abb.29 dargestellten Anlieferungspreise. Für einen Koksanteil von 0%, d.h. für Braunkohle kann ein Wärmepreis von 2,46 RM/10^6 kcal oder bei einem unteren Heizwert von 4720 kcal ein Brennstoffpreis von 11,60 RM/t gezahlt werden und für 100% Koksanteil, d.h. für Koksgrus (5000 kcal) ein Wärmepreis von 1,68 RM/10^6 kcal und ein Brennstoffpreis von 8,30 RM/t.

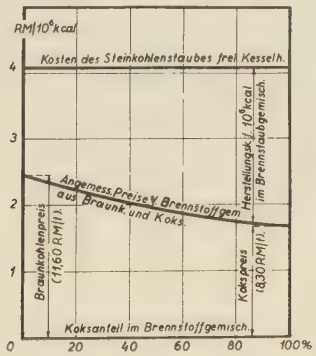


Abb.29. Preisermittelung in RM/10^6 kcal für Braunkohle und Koks.

E. Schlusswort

Vorstehende Arbeit hatte die Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Vorbedingungen für die Aufbereitung und Verfeuerung von Brennstoffgemischen aus Braunkohle und Koksgrus zum Gegenstand. Es wurden einerseits die Mahlbarkeit vorstehender Gemische und ihre brenntechnischen Eigenschaften untersucht, andererseits die Aufbereitungskosten ermittelt und die Wirtschaftlichkeit der Verfeuerung von Koksgrus und Braunkohle in Staubform geprüft.

Die Versuche lassen erkennen, dass der Koksgrus trotz seiner Sprödigkeit auf Ringwalzenmühlen einwandfrei vermahlen werden kann und dass der Ausbrand des Koksstaubes in einer ungekühlten Brennkammer zufriedenstellt. Die Zündung beim Anfahren des Kessels bereitet keine Schwierigkeiten, wenn dem Koksgrus ein gasreicher Brennstoff, wie z.B. Braunkohle, zugemischt wird. Auf diese Weise dürfte sich auch eine einwandfreie Verfeuerung in gekühlter Brennkammer erreichen lassen.

Die Kosten für die Vermahlung des Koksgruses zu brennfertigem Staub sind unter Berücksichtigung des Kapitaldienstes etwa doppelt so hoch wie diejenigen für Steinkohle, sein Heizwert ist ausserdem geringer, so dass der Koksgrus etwa nur halb so viel kosten darf wie Steinkohle, wenn er mit dieser in Wettbewerb treten will. Eine Kostengegenüberstellung ergibt beispielsweise, dass der Koksgrus bei einem Anlieferungspreis von 8,30 RM/t und die Braunkohle als Zusatzbrennstoff bei einem solchen von 11,60 RM/t wirtschaftlich in Staubform verfeuert werden können.

Dass die Koksstaubfeuerung trotzdem für die öffentliche Stromerzeugung ernstliche Bedeutung hat, beweist der Umstand, dass sie bereits im E-Werk Leipzig seit einigen Jahren praktisch angewendet wird.

Schrifttum

Bücher

1. Vereinigung der Elektrizitätswerke, „Ueber die Frage der Verwendungsmöglichkeit von Koks, Braunkohle und Gas im Kesselfeuerungsbetrieb der Elektrizitätswerke", Dresden 1915, Verlag W. Meng.
2. Hold, „Die Rheinisch-Westfälische Steinkohle in der Staubfeuerung".

Zeitschriften

1. Archiv für Wärmewirtschaft 1926, Heft 2, Seite 49/53, Rosin und Rammler, „Auswertung von Siebanalysen und Kennlinien für Kohlenstaub".
2. Archiv für Wärmewirtschaft 1926, Heft 2 und 3, Seite 54-57 und 81-85, Rosin und Rammler, „Kraftbedarf von Kohlenstaubmühlen".
3. Archiv für Wärmewirtschaft 1927, Heft 3 und 4, Seite 69 bis 73 und 109-115, Rosin und Schulz, „Kraftbedarf von Kohlenstaubmühlen".
4. Braunkohle, Jahrgang 1926, Nr. 30, Seite 689, Förderreuther, „Ueber die Bestimmung der Feinheit von Kohlenstaub".
5. Braunkohle 1927, Nr. 42, Steinbrecher, „Selbstentzündungstemperaturen des Kohlenstaubes".
6. Zeitschrift für angewandte Chemie 1913, Seite 273, Nusselt, „Ueber die Entzündungstemperaturen besonders von Brennstoffen".
7. Gas- und Wasserfach 1922, Heft 30, Seite 478, Plenz, „Die Entzündungstemperatur von Braunkohlengrude".
8. Gas- und Wasserfach 1922, Heft 37, Seite 592, Bunte & Kölmel, „Entzündungstemperaturen von Entgasungsprodukten".
9. Gas- und Wasserfach 1924, Heft 45, Seite 680, Faber, „Entzündungstemperaturen einiger Braunkohlengruden".
0. Gas- und Wasserfach 1928, Heft 39, Seite 937, Albach, Berlin-Tegel, „Ueber Koksgrus"Feuerungen".

Lebenslauf

Am 20. April 1900 wurde ich, Martin Blanke, als Sohn des Kaufmanns Albert Blanke in Frankfurt/O. geboren; 1918 verliess ich das dortige Real-Gymnasium mit dem Zeugnis der Reife und rückte anschliessend in's Feld. Nach Kriegsende erwarb ich als Lehrling im Eisenbahn-Werkstättenamt Frankfurt/O. die für das technische Studium erforderlichen praktischen Kenntnisse und wandte mich dem Studium des Maschinenbaues zu, das ich an der Technischen Hochschule zu Breslau im Herbst 1924 mit der Diplom-Hauptprüfung beendete. Mein Eintritt in das Berufsleben vollzog sich unter wirtschaftlich recht schwierigen Umständen. Vorübergehend beschäftigt war ich bei den Firmen Koehlmann & Co., Stärke-Zuckerfabrik A.G. in Frankfurt/O., A. Borsig G.m.b.H. in Berlin-Tegel, Zuckerfabrik Hötensleben bei Magdeburg, Büttnerwerke A.G. in Uerdingen a.Rh., und Zuckerfabrik Poln. Peterwitz Kr. Breslau, wo ich anfangs mit zeichnerischen Arbeiten und zuletzt mit der Leitung des Betriebes in der Nachtschicht betraut wurde.

Seit 1927 stehe ich im Dienste der Berliner Städtische Elektrizitätswerke Akt.Ges. (Bewag) mit einjähriger Unterbrechungszeit, welche mit Versuchen über die Speicherung von Strom in Form von Wasserstoff ausgefüllt war.